

| | |
|------------|--|
| 氏 名 | 金岡 佳充 |
| 学 位 の 種 類 | 博士（工学） |
| 学 位 記 番 号 | 博甲第977号 |
| 学位授与の日付 | 平成20年3月22日 |
| 学位授与の要件 | 課程博士(学位規則第4条第1項) |
| 学位授与の題目 | 周期加熱法を用いた MEMS フローセンサによる流速測定法の研究 |
| 論文審査委員（主査） | 木村 繁男（環日本海域環境研究センター・教授） |
| 論文審査委員（副査） | 上野 久儀（自然科学研究科・教授），木村 春彦（自然科学研究科・教授）， 岡島 厚（金沢学院短期大学・教授），木綿 隆弘（自然科学研究科・准教授） |

Most flow sensors manufactured by MEMS technologies utilize heat transfer characteristics which are modified by the fluid velocities. Main advantage of the sensor lies on the very low heat capacity. However, it seems that this advantage has not been fully exploited, and most of the sensors still rely on the method to convert absolute temperature changes to flow velocities. This method requires precise electrical circuitry, making the flow meter expensive. In this paper, a new method for measuring flow velocity has been proposed. It adopts periodic heating as an input signal, and flow velocity is deduced from the phase delay of output signal, coming from adjacent temperature sensors. Since this method doesn't use absolute values of the temperature, but only phase delay, it has a strong robustness against possible noise. We have developed simplified models based on a quasi-steady state of thermal convection in fluid, and compared the model predictions with experimental results. It's found that the model is able to explain the experimental results qualitatively. The proposed method, which makes use of a micro sensor manufactured by MEMS technologies, provides a wide dynamic-range of flow velocity measurements with a simple electronic circuit.

緒言

流量測定の対象範囲は非常に広く、また、測定対象の流体也多岐にわたる。多くの種類の流量計が開発され、実用化されている。近年では MEMS (Micro Electro Mechanical System) 技術を用いて作製したフローセンサを使った流量計が開発されている。ほとんどの MEMS フローセンサは、流れの影響による熱の移動の変化を利用しており、温度の絶対値を正確に測定して流量に変換する必要があるため、センサ回路が高価になってしまう問題がある。本研究では、周期加熱法を応用することにより、温度の絶対値測定によらない流速測定方法を考案し、MEMS フローセンサを用いて測定可能であることを実証した。またフローセンサとその周囲の熱移動に関する数値解析を行い、フローセンサの動作特性を定性的かつ定量的に説明することができた。

流速測定法

流速の測定には、一対のヒータと温度センサを用いる。ヒータの温度を単振動的に変動（周期加熱）させると、所定の距離 d だけ離して配置した温度センサは、ヒータの温度変動と同じ周波数の正弦波を出力するが、位置の違いから位相差 ϕ_d を持つ。周囲の流体が流れているとき、 ϕ_d が流速 U に応じて変化することを利用して流速測定を行う（図1）。

流速測定の実証実験

MEMS 技術を用いてヒータとサーモパイル（温度検出素子）で構成されるフローセンサを作製した（図2）。フローセンサを流路に取り付け、ヒータに直流オフセットした 200Hz の正弦波の電圧波形を印加し、流路に流す N_2 ガスの流量を変えながら、オシロスコープによりヒータ駆動波形とサーモパイルの出力波形の位相差 ϕ_d を測定した。得られた流速 U と ϕ_d の関係（ $U-\phi_d$ 特性）を図3に示す。流路内の平均流速が大きくなるほど $|\phi_d|$ は単調減少した。この実験により、50m/s 以上の流速まで、周期加熱法により測定可能であるこ

とが確認できた。これは従来の温度の絶対値を流速に変換する方式で測定できる範囲より五倍以上広い。図3には周期加熱法の曲線の他に、同じフローセンサのヒータを2mAの直流電流で加熱したときの、流速に対するヒータの上流側と下流側のサーモパイル出力の差(温度の絶対値に相当する)の変化も示しているが、こちらは10m/s付近にピークを持つため、それ以上の流速は測定できない(流速と温度差が一対一に対応しない)。

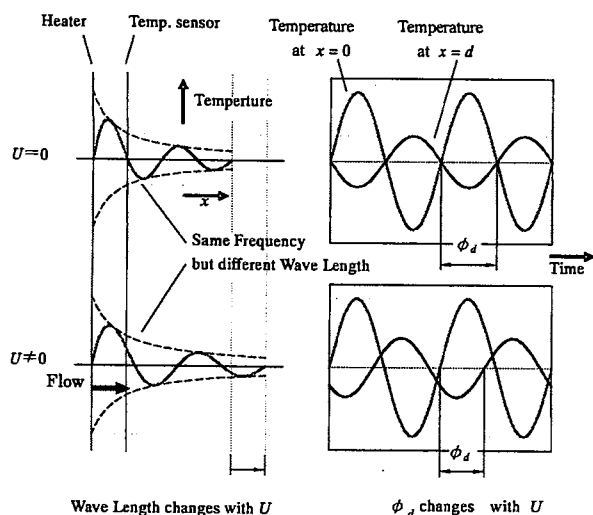


図1 測定原理の概略

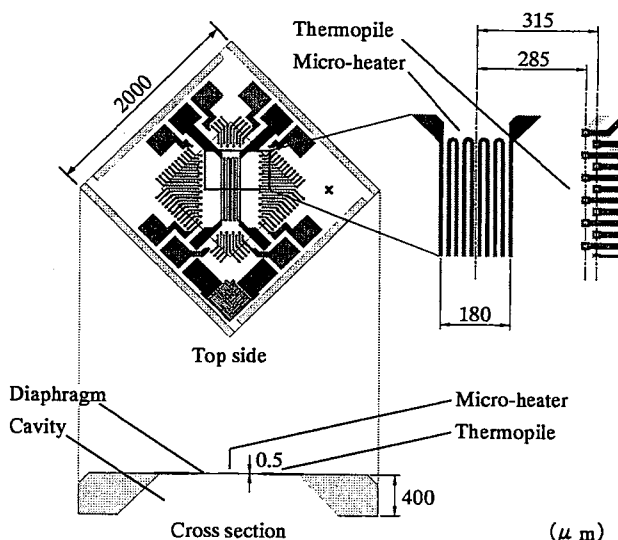


図2 フローセンサの構造

フローセンサの諸特性

周期加熱法による流速測定の様々な基礎データを収集した。まず、加熱条件とセンサ特性の関係を、ヒータ駆動波形のオフセット、振幅、周波数などをパラメータとして調査した。なかでも加熱周波数が ϕ_d に強く影響することが判明した。図4に示したフローセンサの周波数特性から、流速測定が可能なのは、周波数の増加とともに位相差が大きくなる10Hz~1kHzの周波数帯に限られることがわかった。この周波数帯においては、加熱周波数が高くなるとサーモパイルの出力波形の振幅が小さくなり $|\phi_d|$ が大きくなる。したがって、加熱周波数によりフローセンサの特性を調節可能である。つぎに、温度検出位置とセンサ特性の関係について調査した。図5のように、ヒータから温度検出位置までの距離 d が大きくなると、 U に対する ϕ_d の傾きが大きくなり、流速の検出感度が向上する。ただし、S/N比が悪化するというトレードオフの関係となっている。フローセンサの特性は加熱周波数と温度検出位置を調節することにより、用途に合わせて最適化する必要がある。さらに、低流速域・高流速域の $U-\phi_d$ 特性についても調査した。図6のように、低流速域において、最大位相差流速 U_ϕ がゼロとならない(ピークが存在する)ことを確認した。 U と ϕ_d が一対一に対応しないため、低流速の測定には何らかの対策が必要である。一方、高流速域については、音速付近でも U と ϕ_d が一対一に対応している(測定可能である)ことがわかった。

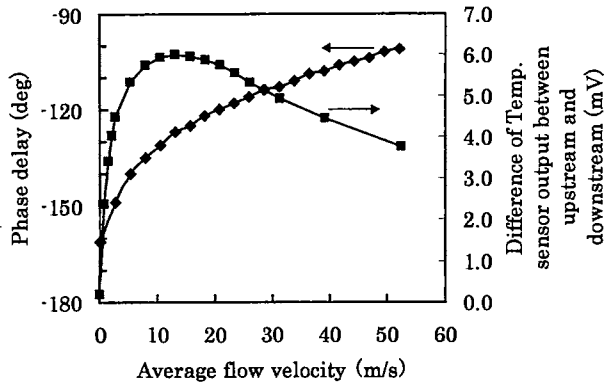


図3 流速と位相差・温度差の関係

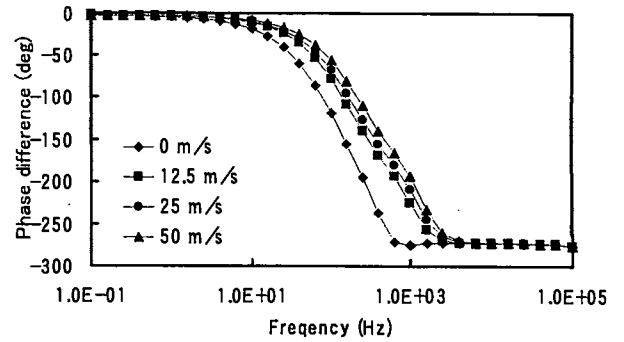


図4 フローセンサの周波数特性

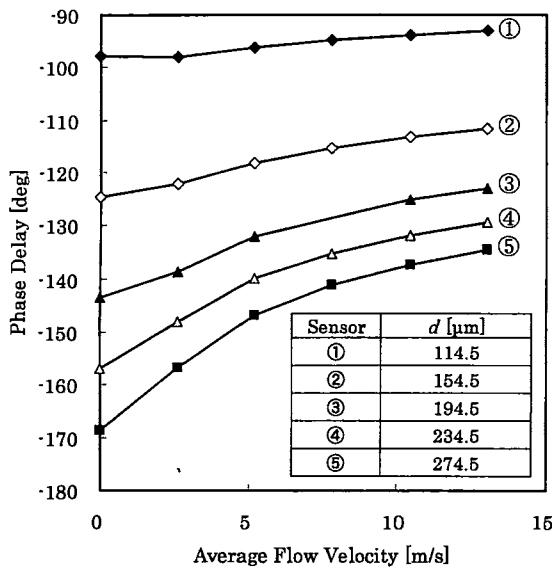


図5 温度検出位置によるセンサ特性の変化

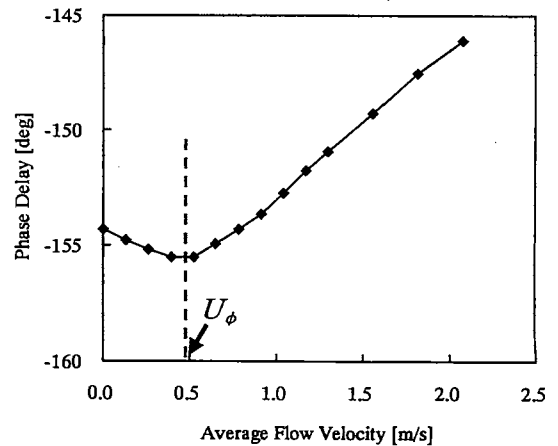


図6 低流速域における流速と位相差の関係

数値モデルの検討

周期加熱法による流速測定の方法を理論的に解明するために、形状を簡略化した一次元および二次元の数値モデルを用いて、フローセンサの熱移動に関する定式化を検討した。

一次元モデルは定量的な精度は悪いものの、周期加熱法による流速測定の基本的な特性については、定性的に模擬できる。解析解が得られたため、簡易的な特性解析を表計算レベルで行うことができる。二次元モデルは実際のセンサチップの三層構造を考慮し、次のような支配方程式を適用した。なお、下記(b), (c)は、図2のダイアフラムとキャビティの熱伝導を表している。 θ は温度、 k は熱伝導率、 ρ は密度、 c は比熱、添え字のFは流れ、Dはダイアフラム、Cはキャビティである。

(a) 測定流体層

$$\rho_F c_F \left(\frac{\partial \theta_F}{\partial t} + U \frac{\partial \theta_F}{\partial x} \right) = k_F \left(\frac{\partial^2 \theta_F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_F}{\partial y^2} \right)$$

(b) ダイアフラム層

$$\rho_D c_D \frac{\partial \theta_D}{\partial t} = k_D \left(\frac{\partial^2 \theta_D}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_D}{\partial y^2} \right)$$

(c) キャビティ層

$$\rho_c c_c \frac{\partial \theta_c}{\partial t} = k_c \left(\frac{\partial^2 \theta_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta_c}{\partial y^2} \right)$$

この支配方程式は、有限要素法により数値解を求めた。二次元モデルの数値計算結果は、一次元モデルでは再現できなかった $U_\phi > 0$ となる現象についても定性的に模擬できる (図 7)。また、加熱条件や温度検出位置、流速に対しての温度センサの出力波形の挙動は、実験結果に対し、一定のずれを持つものの、定量的にも良い近似ができる。一例として、二次元モデルによる数値計算結果と実験による $U-\phi_d$ 特性を図 8 に示す。

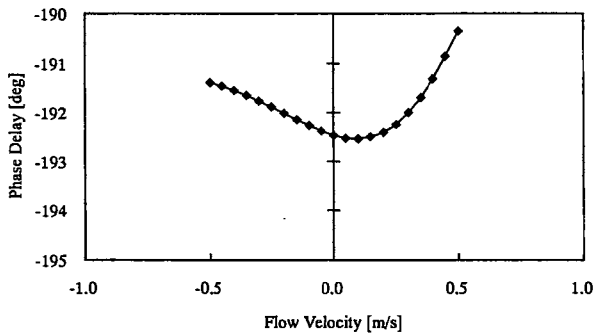


図 7 二次元モデルによる低流速域のフローセンサ特性

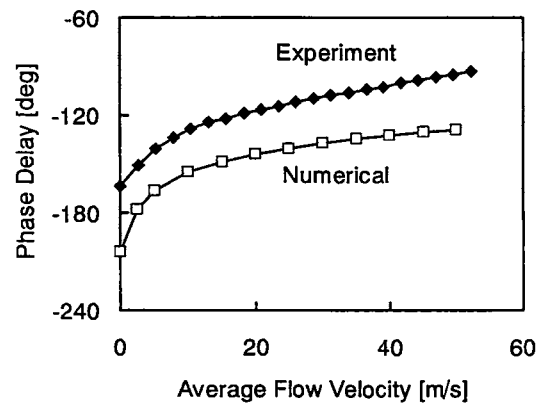


図 8 二次元モデルによる数値計算結果と実験結果の比較

結言

以上のように、本研究の目的とした、熱を利用するが、温度の絶対値測定によらない流速測定法の実現のため、周期加熱法による流速測定について検討し、流速測定可能であることを実証した。また、様々な実験結果と数値モデルの検討から、この測定法の持つ様々な特性が明らかになった。本研究の流速測定法は MEMS フローセンサや、その流量計の回路を簡単にできるだけではなく、性能面においても、従来水準から大きく引き上げる可能性を持っている。

参考文献

金岡佳充, 木村繁男, 木綿隆弘, 岡島厚, 木村修, 谷川純也, 周期的に温度変動する熱源を用いた新しい流速測定方法と MEMS 技術により作製した流速センサの特性, 日本機械学会論文集 B 編, 第 72 巻, 第 723 号, pp. 2596-2603

Y. Kanaoka, S. Kimura, M. Vynnycky, O. Kimura, T. Kiwata: METHOD FOR MEASURING FLOW VELOCITY BASED ON PERIODIC HEATING AND MEMS TECHNIQUES, International Journal of Transport Phenomena, in press.

学位論文審査結果の要旨

第1、2回学位論文審査委員会を平成20年2月1日午前と午後を開催し、2月1日口頭発表を行い、同日最終審査委員会を開催した。協議の結果、以下の通り判定した。

本研究はMEMS技術を応用して開発された小型流量計の計測方法と計測特性に関するものがある。従来のMEMSフローセンサは、温度の絶対値を計測することにより流速および流量を算出するものであった。これに対して本研究では周期加熱法を用いることによりセンサの温度をアナログ値として計測する必要がなく、きわめて安価な電気回路により流速・流量の算出が可能となる画期的なフローセンサを開発した。

本フローセンサの測定原理は、発熱部を周期的に加熱した時、下流側で発生する温度変動の位相遅れが広範囲で流速と強い相関を有することに基づいている。本研究では実験で実証されたセンサの熱的諸特性について、一次元の移流拡散方程式および二次元有限要素数値モデルにより解析を行い、これらの特性に対して明確な物理的説明を与えることができた。本数値モデルの完成により、MEMSフローセンサに与える加熱条件、センサ寸法、センサ材質の影響について迅速に評価することが出来るようになった。

このように本研究成果はMEMS技術を応用した新規フローセンサの開発・設計に資すること大であり、博士（工学）と認定することとした。